

# **Sternentstehung**

Zustandsgrößen des sonnenähnlichen aber sehr jungen Sterns P1724 in Orion

Astrophysikalisches Praktikum LMU München  
Sommersemester 2004  
Praktikanten: Jan-Timm Kuhr, Julia Linder  
Betreuer: Keith Butler

Versuchstag: 28.04. / 05.05.2004  
Abgabe: 12.05.2004

## Einleitung

Im Zuge dieses Versuches sollen die Zustandsgrößen des jungen sonnenähnlichen Sternes P1724 bestimmt werden.

Dieser Stern gehört zu den T-Tauri-Sternen (TTS), was bedeutet dass er ein junger Vor-Hauptreihen-Stern ist und somit noch kein stabiles Wasserstoffbrennen in seinem Inneren begonnen hat. Die vom Stern abgestrahlte Energie wurde rein durch Kelvin-Helmholtz-Kontraktion gewonnen.

Die typische Balmerlinie bei Sternen dieser Art liegt bei  $6564\text{\AA}$ , ihre Lithiumlinie bei  $6707\text{\AA}$ . Wegen ihrer Nähe zu jungen massenreichen OB-Sternen kann man auf ihre geringe Masse ( $0,3-3M_{\text{Sonne}}$ ) und ihr geringes Alter ( $10^5-10^7$ Jahre) schließen. Die TTS gehören definitionsgemäß zu den Spektraltypen F7-M, woraus man eine Oberflächentemperatur von  $3500-6000\text{K}$  abschätzen kann. Die massearmen TTS bestehen aus tiefen Konvektionszonen oder sind ab einer unteren Massegrenze vollständig konvektiv.

Ein massearmer Stern entwickelt sich, wenn die Dichte im Zentrum einer sternbildenden Wolke hoch ist und sich somit in deren Innerem ein hydrostatisches opakes Objekt bildet. Material von der Wolke fällt innen schneller als weit vom Zentrum entfernt, sog. Inside-out fall. Dadurch aggregiert Material mit geringem Drehimpuls im Zentrum und Material mit hohem Drehimpuls bildet eine Scheibe um den nun im Infraroten sichtbaren Protostern.

Die TTS entwickeln sich nun im HRD von ihrer birthline weg in Richtung ZAMS, d.h. im HRD zuerst nach unten (Hayashi-Track, d.h. Temperatur bleibt konstant, aber Radius und Leuchtkraft nehmen ab, d.h. Kontraktion); bei massereichen TTS bildet sich ein Kern mit Strahlungsgleichgewicht aus und der radiative Track (Radius und Leuchtkraft bleiben nahezu konstant, aber Temperatur nimmt zu) im HRD führt nach links Richtung ZAMS, bis sie diese schließlich erreichen und somit in das Hauptreihenstadium eingetreten sind.

In den massearmen Sternen setzt die Lithiumverbrennung durch Protoneneinfangprozesse ein, bei M-Typen wegen Konvektion schneller.

Da im Inneren der TTS weniger Druck und eine niedrigere Temperatur als bei normalen Sternen herrscht, setzen die Verbrennungen bei dieser Art von Sternen später ein.

In ihrer Anfangsphase sind sie rein durch die von der Kelvin-Helmholtz-Kontraktion emittierten Strahlung beobachtbar.

Da viele TTS von kalten protoplanetaren Scheiben umgeben sind, ist bei ihnen eine Planetenentstehung sehr wahrscheinlich. Die Scheiben bei cTTS haben die Ausmaße von  $20-150\text{AE}$ , was ungefähr der Größe unseres Sonnensystems ( $100\text{AE}$ ) entspricht.

Die spektrale Energieverteilung der TTS weicht von dem der Schwarzkörper ab: zum einen ist eine Intensitätserhöhung im UV-Bereich beobachtbar, was dadurch zu erklären ist, dass Material aus der zirkumstellaren Hülle auf den Stern fällt und diesen dadurch heizt. Die Intensitätserhöhung im infraroten Bereich lässt auf entfernteres kaltes Material schließen und erhärtet somit die Theorie einer den Stern umgebenden Staubscheibe.

Es gibt zwei verschiedenen Arten, das Alter der TTS abzuschätzen: man kann den Stern anhand von seiner Temperatur und seiner Luminosität ins HRD eintragen und somit durch Vergleich mit Isochronen anderer Sterne sein Alter herausfinden oder aber man bestimmt seinen Lithiumgehalt und vergleicht diesen mit dem Gesamtlithiumgehalt des Universums. Da seit dem Urknall nur unwesentlich Mengen an Lithium gebildet wurden, kann man mit diesem Verhältnisses das Alter des Sternes eingrenzen.

Die Masse der TTS wird ebenfalls durch den Vergleich der Lage mit anderen Sternen im HRD bestimmt.

## Auswertung des Spektrums

Bei drei Spektren des Sterns P1724 werden die Wellenlängen der H $\alpha$ - und Lithiumlinien bestimmt.

Danach werden die Äquivalenzbreiten  $W_\lambda$  dieser Linien gemessen. Dafür muss die Lage des Kontinuums bestimmt werden. Um Fehleinschätzungen zu vermeiden wurde hierzu der Mittelwert zwischen der Maximal- und Minimalintensität des Kontinuums benutzt.

Die Spektren von P1724 wurden mit dem von Standardsternen verglichen und so der Spektraltyp in etwa bestimmt.

Da bei P1724 eine starke Lithiumlinie vorhanden ist, kann man annehmen, dass es sich hierbei - wie bei fast allen TTS - um einen Stern der Leuchtklasse V, also einen Zwergstern, handelt. Aus Leuchtklasse und Spektraltyp kann die effektive Oberflächentemperatur  $T_{\text{eff}}$  ermittelt werden.

Mit diesen neu erworbenen Daten wird P1724 in ein Lithium-Äquivalenzbreiten -  $T_{\text{eff}}$  - Diagramm geplottet.

Die Wellenlängenbereiche von 5000-8000Å werden von den hier zu untersuchenden Spektren abgedeckt, was ungefähr dem sichtbaren Bereich in den Farben grün, gelb und rot entspricht.

Die spektrale Auflösung kann durch Dividieren des Gesamtwellenlängenbereich durch den Abstand zweier gerade noch als getrennt auflösbaren Punkten berechnet werden:

$$R = \frac{6540}{1.67} = 4000$$

Die H $\alpha$ - und Lithium-Linien wurden bei den folgenden Wellenlängen gefunden:

<b>Spektrum</b>	<b>H<math>\alpha</math> [Å]</b>	<b>Li [Å]</b>
P1724spec-high1.fits	6563.28	6708.78
P1724spec-high2.fits	6561.51	6708.21
P1724spec-low.fits	6561.89	6708.79
Ruhewellenlängen	6564	6707

Tabelle 1: Gemessene Wellenlängen

Die gemessenen Wellenlängen weichen von den Ruhewellenlängen von H $\alpha$  und Lithium ab, da der Stern sich von der Erde entfernt und somit der Dopplereffekt auf das vom Stern die Erde erreichende Licht wirkt, d.h. das Spektrum des Sternes ist rotverschoben.

Die Linien sind nicht symmetrisch, sondern bauen sich durch mehrere Peaks nacheinander auf, die sich alle in die Richtung der größeren Wellenlängen aufreihen. Grund dafür sind die Übergänge zwischen verschiedenen Anregungszustände im Wasserstoff und Lithium. Zudem sind die Linien durch die Konvektionsströme im Stern verbreitert.

Die Äquivalenzbreite ist definiert als Breite eines Rechtecks, dessen Fläche die gleiche ist wie diejenige Fläche unter dem Graphen.

Die Höhe des Kontinuums wurde dreimal abgeschätzt (die obere/untere Grenze wurde dort festgelegt, wo die Schwankung außerhalb der entsprechenden Absorptionslinie wieder ins Kontinuum übergeht).

Um den Schwarzkörperhintergrund zu subtrahieren musste die Kontinuumsgrenze möglichst genau bestimmt werden.

Folgende Äquivalenzbreiten wurden gemessen:

		$H_{\alpha}$	<i>Lithium</i>
P1724spec-high1.fits	Ew (obere Grenze)	-1.71956	0.439660
	Ew (Mittelwert)	-2.15564	0.340179
	Ew (untere Grenze)	-2.75486	0.276526
P1724spec-high2.fits	Ew (obere Grenze)	-0.3633	0.4365
	Ew (Mittelwert)	-0.8668	0.2916
	Ew (untere Grenze)	-1.5063	0.2385
P1724spec-low.fits	Ew (obere Grenze)	-0.6384	0.3033 / 0.799984
	Ew (Mittelwert)	-1.01972	(kein Kontinuum erkennbar)
	Ew (untere Grenze)	-1.7089	0.163806

Tabelle 2: Gemessene Äquivalenzbreiten

Wegen Messfehlern, unterschiedlicher spektraler Auflösung und intrinsischer Variabilität variieren die Äquivalenzbreite der Linien verschiedener Spektren. Außerdem kann eine Unsicherheit in der Bestimmung des Kontinuums nicht ausgeschlossen werden.

Durch Vergleichen des Spektrums (Anlagen 1 – 3) mit Spektren vorgegebener Standardsterne wird der Spektraltyp von P1724 bestimmt. Interessant ist hierbei insbesondere das Kontinuum und die Natriumlinie, da die bei P1724-Spektren besonders prägnanten  $H_{\alpha}$  und Lithiumlinien nur ein Zeichen für einen jungen Stern sind.

G-Sterne scheiden aus, da die Lithium-Absorptionslinie bei dieser Art von Sternen nicht genügend ausgeprägt ist (obwohl dies ein nicht so sehr ins Gewicht fallende Argument ist). Alle Sterne mit einem niedrigerem Typen als K6 kommen wegen fehlender Natriumlinie ebenfalls nicht in Frage. Schlussendlich wurde der Spektraltyp auf K3 festgesetzt, da hierbei die Neigung des Kontinuums mit dem gemessenen Spektrum übereinstimmt.

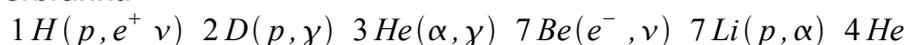
Die Leuchtkraftklasse des Sternes P1724 kann als V angenommen werden, da er eine starke Lithiumlinie aufweist und es sich somit um einen Zwergstern handelt.

Somit ist die effektive Oberflächentemperatur eines K3-Sternes 4732.5K (gemittelter Wert aus der Literatur), d.h. in dieser Temperatur ist die Energieabstrahlung maximal.

Aus der Lage des Sternes im Lithium-Äquivalenzbreiten-Teff-Diagramm (Anlage 4) kann man schließen, dass es sich um einen TTS handelt und nicht um einen Plejadenstern. Desweiteren kann man P1724 als wTTS klassifizieren, da die Lithiumlinie schmaler als  $10\text{\AA}$  ist, und somit keine Staubscheibe zur Verbreiterung der Linie beigetragen hat.

Die Plejaden befinden sich im Diagramm links unten, da bei ihnen das Wasserstoffbrennen schon eingesetzt hat und sie somit wärmer sind.

Auf Grund ihres hohen Alters haben sie ihr gesamtes Lithium in folgendem Prozess schon verbrannt:



## Auswertung photometrischer Daten

Anhand von CCD-Aufnahmen des Sternes P1724 werden nun seine Zustandsgrößen ermittelt. Dunkelstrom und Flat-field wurde bei den zur Verfügung gestellten Aufnahmen schon korrigiert, dennoch muss man auf den Vergleich mit Standardsternen zurückgreifen, um die Magnitude der gewünschten Sternes anhand der Photos bestimmen zu können. Dazu werden bei Sternen bekannter Magnitude die instrumentelle und meteorologische Konstante bestimmt, um später bei der Gleichung für den zu messenden Stern nur noch die scheinbare Magnitude als Unbekannte zu haben. Aus der scheinbaren Magnitude kann man dann mit Hilfe von Aufnahmen des selben Sternes in anderen Bändern die Magnitude bestimmen, aus der sich dann wiederum der Fluss des Sternes errechnen lässt.

Auf Aufnahmen von den Standardsternen PG0942 B C und D im V-Band wurden Kreise mit verschiedenen Radien (10-20-30 / 15-30-45 / 20-40-60) um die Sterne gelegt und innerhalb derer die instrumentelle Magnitude und die Luftmasse (Secans der Höhe des Sterns über dem Horizont) gemessen, jeweils einmal vor der Messung von P1724 und danach (Anlage 5).

Berechnung der instrumentellen Magnitude:

Vor der Messung:

$$V_{instr, B} = \frac{(-8.229 - 8.296 - 8.257)}{(3)} = -8.242, \quad V_{instr, C} = -7.818, \quad V_{instr, D} = -6.979$$

Nach der Messung:

$$V_{instr, B} = -8.27, \quad V_{instr, C} = -7.839, \quad V_{instr, D} = -7.014$$

Mit Hilfe der Formel

$$V = c + V_{instr} - kY$$

mit V gleich der scheinbare Magnitude, c instrumentelle Konstante,  $V_{instr}$  instrumentelle Magnitude, k meteorologische Konstante und Y Luftmasse

wird ein Gleichungssystem erstellt, um k und c aus den Standardsterngleichungen zu extrahieren und damit die scheinbare Magnitude des Sternes P1724 zu berechnen.

Gleichung für k:

$$k = \frac{(V_{instr.vor} - V_{instr.nach})}{(Y_{vor} - Y_{nach})}$$

Daraus ergeben sich die folgenden Werte:

$$k_D = 0.1080, \quad k_C = 0.0810, \quad k_B = 0.1351 \Rightarrow \tilde{k} = 0.1080 \pm 0.0128$$

Gleichung für c:

$$c = V - V_{instr} + kY$$

$$c_D = 22.0974, \quad c_C = 22.9274, \quad c_B = 21.2727 \Rightarrow \tilde{c} = 22.0992 \pm 0.3904$$

Für P1724 ist die instrumentelle Magnitude  $V_{instr} = -11.176 \pm 0.38$

Daraus folgt für die scheinbare Magnitude des Sternes P1724:

$$V_{P1724} = 22.0992 - 11.176 - 0.1080 \cdot 1.1743 = 10.796 \pm 0.4$$

Zur Korrektur der Absorption werden folgende Formeln angewendet:

$$U = U_0 + A_U = U_0 + \left(\frac{A_U}{A_V}\right) A_V \qquad B = B_0 + A_B = B_0 + \left(\frac{A_B}{A_V}\right) A_V$$

$$\frac{A_U}{A_V} = \frac{(1.569+1.531)}{2} = 1.55 \pm 0.02 \qquad \frac{A_B}{A_V} = \frac{(1.337+1.332+1.325)}{3} = 1.331 \pm 0.006$$

$$U = 13.1 \pm 0.1 \qquad B = 11.9 \pm 0.2$$

$$(U-B)_0 = \frac{(1.13+1.20)}{2} = 1.165 \pm 0.035 \qquad (B-V)_0 = \frac{(1.20+1.30)}{2} = 1.25 \pm 0.05$$

$$(U-B) = (U-B)_0 + \left(\frac{A_U}{A_V} - \frac{A_B}{A_V}\right) A_V \qquad (B_V) = (B_V)_0 + \left(\frac{A_B}{A_V} - 1\right) A_V$$

$$A_V = \frac{((U-B) - (U-B)_0)}{\left(\frac{A_U}{A_V} - \frac{A_B}{A_V}\right)} \qquad A_V = \frac{((B-V) - (B-V)_0)}{\left(\frac{A_B}{A_V} - 1\right)}$$

Unter der Annahme, dass P1724 den Spektraltyp K3.5 hat, kann dann mit den Eigenfarben  $(U-B)_0$  und  $(B-V)_0$ , die in Tabellen für den jeweiligen Spektraltyp nachgeschlagen werden können, berechnet werden:

$$(U-B)_0 = 0.86 \qquad (B-V)_0 = 1.00$$

$$A_V = 1.09 \qquad A_V = \frac{(11.9 + 0.302)}{2} = 0.302$$

$$\tilde{A}_V = \frac{(1.09 + 0.302)}{2} = 0.691 \pm 0.405$$

Mit der nun errechneten Absorption kann die Magnitude im V-Band bestimmt werden:

$$V = V_0 + A_V \Rightarrow V_0 = V - A_V = 10.8 - 0.7 = 10.1 \pm 0.4$$

Die Magnituden in den anderen Bändern ergeben sich nach äquivalenter Rechnung:

$$U_0 = U - A_U = U - \left(\frac{A_U}{A_V}\right) A_V = 13.1 - 1.55 \cdot 0.69 = 12.0 \pm 0.62$$

$$U_0 = 12.0 \pm 0.6 \quad U = 13.1 \pm 0.1 \quad A_U = 1.0695$$

$$B_0 = 10.98 \pm 0.5 \quad B = 11.9 \pm 0.2 \quad A_B = 0.9184$$

$$V_0 = 10.1 \pm 0.4 \quad V = 10.8 \pm 0.4 \quad A_V = 0.691$$

$$R_0 = 9.28 \pm 0.3 \quad R = 9.8 \pm 0.1 \quad A_R = 0.5168$$

$$I_0 = 8.77 \pm 0.2 \quad I = 9.1 \pm 0.1 \quad A_I = 0.3326$$

$$J_0 = 8.99 \pm 0.1 \quad J \approx 8.2 \quad A_J = 0.1926$$

$$H_0 = 7.37 \pm 0.1 \quad H = 7.5 \pm 0.1 \quad A_H = 0.1259$$

$$K_0 = 7.22 \pm 0.1 \quad K = 7.3 \pm 0.1 \quad A_K = 0.0803$$

$$L_0 = 6.96 \pm 0.1 \quad L = 7.0 \pm 0.2 \quad A_L = 0.0382$$

Aus den daraus gewonnenen Informationen können nun die Flüsse  $\lambda \cdot F_\lambda$  für jedes Band UBVRIJHKL berechnen:

$$\lambda \cdot F_\lambda = (\lambda \cdot F_\lambda^0) \cdot 10^{(-0.4 \cdot m_{\lambda,0})} \Rightarrow \log(\lambda \cdot F_\lambda) = \log(\lambda \cdot F_\lambda^0) + (-0.4 \cdot X_0)$$

$$\log(UF_U) = -16.2$$

$$\log(BF_B) = -15.6$$

$$\log(VF_V) = -15.46$$

$$\log(RF_R) = -15.47$$

$$\log(IF_I) = -15.56$$

$$\log(JF_J) = -15.71$$

$$\log(HF_H) = -15.87$$

$$\log(KF_K) = -16.3$$

$$\log(LF_L) = -16.93$$

Diese errechneten Flüsse in den verschiedenen Bändern werden nun gegen die Wellenlängen geplottet, und der so entstandene Graph mit anderen Plots von Standardsternen (ggf. durch Verschiebung dieser Plots in Flux-Richtung) verglichen (Anlagen 6 a – c).

P1724 stimmt am besten mit einem G6-Stern wie unsere Sonne überein.

Der Plot weist keine Exzesse im UV- oder IR-Bereich auf, was bedeutet, dass weder Material auf den Stern einstürzt, noch eine Staubscheibe von dem Stern erwärmt wird (cTTS hätten noch eine Staubscheibe sowie einstürzendes Material, d.h. P1724 ist ein wTTS).

Die Effektivtemperatur kann wiederum in der Literatur nachgeschlagen werden: 5487.5K für einen Sterntypen G6.

Mit dieser Information kann man die bolometrische Korrektur B.C. nachgeschlagen: diese ist -0.38.

Die bolometrische Magnitude ist die integrierte logarithmische Leuchtkraft (Magnitude eines Sternes in allen Bändern).

Die scheinbare bolometrische Magnitude  $m_{bol}$  kann durch folgende Formel berechnet werden:

$$m_{bol} = m_{v,0} + B.C. = 10.1 - 0.38 = 9.72 \pm 0.4$$

Die absolute bolometrische Magnitude  $M_{bol}$  erhält man aus:

$$m_{bol} - M_{bol} = 5 \cdot \log 460 - 5 \Rightarrow M_{bol} = 1.42 \pm 0.57$$

da sich P1724 laut Literatur in 460pc Entfernung befindet.

Damit wird wiederum die absolute bolometrische Leuchtkraft  $L_{bol}$  bestimmt:

$$M_{bol} - M_{bol}^\ominus = -2.5 \cdot \log \frac{L_{bol}}{L_{bol}^\ominus} \Rightarrow L_{bol} = L_{bol}^\ominus \cdot 10^{\frac{M_{bol} - M_{bol}^\ominus}{-2.5}} = 8.21 \cdot 10^{27} W$$

mit  $M_{bol}^\ominus = 4.74 mag$  und  $L_{bol}^\ominus = 3.86 \cdot 10^{26} W$

Nun kann der Stern ins HRD eingetragen werden. Durch Vergleich der theoretische Isochronen und mass tracks kann das Alter und die Masse des Sternes extrapoliert werden (Anlage 7).

Für P1724 ergibt sich da Alter zu  $10^6$  Jahren und seine Masse ist ungefähr

$$4 M_{\odot} \approx 8 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

Den Radius erhält man aus der Stefan-Boltzmann-Relation, wenn man Leuchtkraft und Temperatur kennt:

$$L_{bol} = 4 \pi R^2 \sigma T_{eff}^4 \Rightarrow R = 5 \cdot 10^6 \text{ km}$$

Ebenso leicht kann man nun die Oberflächenschwerkraft berechnen:

$$g = G \cdot \left( \frac{M}{R^2} \right) = 21.6 \text{ ms}^{-2}$$

Als die Sonne so jung wie P1724 heute war, lag sie im HRD ebenfalls auf der  $10^6$  - Isochrone und auf dem  $1 M_{\odot}$  -mass track.

Somit ergibt sich ihre effektive Oberflächentemperatur in dieser Zeit zu 4466K (somit war ihr damaliger Spektraltyp K4.5), ihre Leuchtkraft zu  $2.5 L_{heute} = 9.7 \cdot 10^{26} \text{ W}$ .

Der Radius der jungen Sonne ergibt sich aus Stefan-Boltzmann:  $R = 1.85 \cdot 10^6 \text{ km}$

die Oberflächenschwerkraft ist  $g_{damals} = 38.7 \text{ ms}^{-2}$ .

## Ergebnisse

	<b>Sonne heute</b>	<b>Sonne damals</b>	<b>P1724</b>
Masse	$1.9891 \cdot 10^{30} \text{ kg}$	$1.9891 \cdot 10^{30} \text{ kg}$	$8 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
Leuchtkraft	$3.86 \cdot 10^{26} \text{ W}$	$9.7 \cdot 10^{26} \text{ W}$	$8.21 \cdot 10^{27} \text{ W}$
Spektraltyp	G6	K4.5	G6
Temperatur	5800 K	4466 K	5487.5 K
Radius	$6.96 \cdot 10^5 \text{ km}$	$1.85 \cdot 10^6 \text{ km}$	$5 \cdot 10^6 \text{ km}$
Oberflächenschwerkraft	$274 \text{ ms}^{-2}$	$38.7 \text{ ms}^{-2}$	$21.6 \text{ ms}^{-2}$

Im Laufe der Berechnungen war der bestimmte Spektraltyp sehr inkonsistent (zuerst K3 dann G6). Durch das Vergleichen von Spektren schlossen wir wegen des Verhältnisses  $H_{\alpha}/Li$  zuerst auf einen Stern des Typs K3. Da jedoch die Lithiumlinie nur etwas über das Alter des Sternes aussagt, war dies ein Trugschluss. Bei der Auswertung der photometrischen Daten wurde dieser Typ K3 angenommen, um die Absorptionskorrektur durchzuführen, was natürlich zu Fehlern führt.

Eigentlich sollten die obigen Berechnungen nochmals mit dem korrigierten Spektraltyp durchgeführt werden, so dass schließlich der verwende gleich dem erhaltenen Spektraltyp ist. Der didaktische Nutzen einer erneuten Berechnung erschloss sich uns jedoch nicht.

P1724 ist ein T-Tauri-Stern ohne circumstellare Scheibe (wTTS). Unsere Berechnungen lassen auf einen leuchtkräftigeren, weil größeren und schwereren Stern als unsere Sonne schließen. Er befindet sich noch im Frühstadium seiner Entwicklung zu einem Hauptreihenstern, stabiles Wasserstoffbrennen wird erst in einigen  $10^7$  Jahren einsetzen.